

УДК 621.319.7.001

doi:10.20998/2413-4295.2017.53.02

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ЗАРЯДКИ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ АЭРОЗОЛЯ

Д. С. ПУСТОВОЙ, И. М. ЧЕБЕРЯЧКО

Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Днепр, УКРАИНА
email: pustovoi.d.s@gmail.com

АННОТАЦИЯ Проанализированы вопросы процессов электроионизации при использовании импульсного коронного разряда, а также предложена система коронирующих электродов типа «острие – сетка». Установлена зависимость концентрации аэроионов от расстояния до ионизатора, позволяющая устанавливать заданный ионный состав для накопления максимально возможной величины заряда на мелкодисперсных частицах, однако скорость воздушного потока ограничивается технологическими параметрами и ее значения определяются в зависимости от условий (конструкции технологического оборудования, типа аспирационной системы и др.), а величина напряжения импульса ограничивается параметрами зарядного устройства при которых исключается «пробой».

Ключевые слова: электроионизация; импульсный коронный разряд; импульсное напряжение; аэрозоль; зарядная камера; коагуляция.

ANALYSIS OF ELECTROIONIZATION PROCESSES WHILE APPLYING PULSE CORONA DISCHARGE TO CHARGE FINELY DISPERSED AEROSOL PHASE

D. S. PUSTOVOI, I. M. CHEBERYACHKO

State HEI "National Mining University", Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT The paper considers problems of electroionization processes while applying pulse corona discharge; in addition, a system of corona producing devices of "point-net" type has been proposed. A dependence of concentration of air ions from distance to ionizer has been determined. The dependence makes it possible to identify the preset ionic composition to accumulate maximum possible charge value within fine-dispersed particles, but the airflow velocity is limited by technological parameters and its values are determined depending on conditions (technological equipment, etc.), and the magnitude of the impulse voltage is limited by the parameters of the charger at which the "breakdown" is excluded. Also on the basis of the studies carried out, a device for generating a high voltage voltage pulse is proposed, which makes it possible to intensify the ionization of the medium in the interelectrode space and at the moments of a pause between the voltage pulses, to ensure the outflow of the ions formed beyond the discharge gap by the moving dust and gas environment.

Key-words: electroionization; pulse corona discharge; pulse voltage; aerosol; charging chamber; coagulation.

Введение

Коронный разряд – вид самостоятельного высоковольтного газового разряда, возникающего в резко неоднородном электрическом поле при превышении напряженностью поля и напряжением на разрядном промежутке начальных значений. Именно коронный разряд используется сегодня в большинстве промышленных высоковольтных электротехнологий. Такими технологиями являются: очистка газовых выбросов от конденсированных частиц в электрофильтрах, технологии получения озона на основе коронного разряда в озонаторах, модификация поверхностей различных материалов, в том числе с целью создания многослойных материалов с различными характеристиками слоев, электросепарация с использованием коронного разряда и др.

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к коронным разрядам. Исследования коронного разряда ведутся в двух направлениях – физические исследования различных коронных

разрядов и их применение для решения технологических задач [1].

Первым промышленным применением коронного разряда была установка для фильтрации паров серной кислоты, созданная Ф.Д. Котреллом [2]. С тех пор фильтрация промышленных газов превратилась в самостоятельную отрасль промышленности. Тепловые электростанции, металлургические и химические предприятия, цементные заводы и многие другие предприятия оборудованы электрофильтрами. Развитие техники фильтрации газов было связано с необходимостью повышения степени очистки газов и уменьшения энергозатрат. Применение короны постоянного тока в электрофильтрах исчерпало возможности повышения эффективности процесса фильтрации. Возросшие требования по очистке производственных выбросов в окружающую среду заставляли искать новые пути повышения эффективности электрофильтров. В настоящее время основной тенденцией является применение импульсных коронных разрядов.

Детальный обзор современного состояния техники электрофильтрации представлен в работе [3].

В последнее время появились новые направления. Например, в работе [4] коронный разряд применен для определения нарушений целостности металлического каната. Широко применяется коронный разряд в электрографии и электростатической печати [5]. Применение коронного разряда для сушки различных материалов позволило получить новую технологию этих процессов [6]. Перспективным остается направление применения коронного разряда для получения и использования озона [7].

Применение импульсных коронных разрядов усложняет источник питания короны. К обычному источнику высокого напряжения добавляется источник импульсного напряжения. Значительное количество промышленных электрофильтров работает при напряжении 40-50 кВ постоянного напряжения. Генерация импульсов более высокого напряжения большой мощности представляет собой сложную задачу. Вопросы создания коротких импульсов высокого напряжения изложены в работах [8-9]. Разрабатываются новые способы генерирования высоковольтных импульсов с регулируемой частотой следования в положительном коронном разряде [10]. В настоящее время основные исследования в области электроочистки газа направлены на системы, включающие в себя большие разрядные промежутки (до 0,5 м) и, как следствие, требующие повышенных напряжений питания как импульсных, так и постоянных.

Во всех перечисленных работах важнейшим элементом является источник импульсного напряжения. Диапазон длительностей импульсов, применяемых в импульсных коронных разрядах, простирается от 10^{-3} до 10^{-9} сек. Требования к длительности импульса, частоте повторения, амплитуде импульса и скорости нарастания фронта для различных применений имеют существенные отличия.

Если обобщить большое количество схем питания импульсных коронных разрядов, то можно определить импульсный коронный разряд как сумму двух разрядов, происходящих в одном разрядном промежутке. Это постоянный коронный разряд, который определяется постоянным напряжением на электродах, и импульсный разряд, который возникает при кратковременном подключении высоковольтного источника. В этом случае источник питания состоит из высоковольтного выпрямителя, который обеспечивает постоянный коронный разряд, и источника повышенного напряжения, который подключается на определенное время через высоковольтный коммутатор.

Параметры высоковольтного импульса будут определяться в основном свойствами коммутатора. В случае импульсного коронного разряда используется

генератор высоковольтных импульсов. В настоящее время существуют системы газоочистки с миллисекундными и микросекундными импульсами. Проводятся исследования по применению наносекундных импульсов. Вопросы создания надежных высоковольтных импульсных систем весьма актуальны на сегодняшний день.

В связи с изложенным, исследование процессов электроионизации пылевого потока и разработка на этой основе способов и средств повышения эффективности улавливания мелкодисперсной пыли является актуальной задачей.

Цель работы

Цель исследований: установить характер изменения концентрации ионов по длине зарядной камеры для создания импульсов униполярного коронного разряда с длительностью и скважностью обеспечивающих максимальный унос ионов за пределы разрядного промежутка.

Изложение основного материала

Исследования проводились в лабораторных условиях на специально созданной для этих целей установке для электроионизации пылегазовой среды (рис. 1), где 1 – металлический трубопровод; 2 – коронирующие электроды; 3 – заземленный электрод; 4 – аспирационный конденсатор; 5 – аппаратный блок для управления импульсным коронным разрядом; 6 – вентилятор; 7 – регулируемый источник питания вентилятора.

В основу экспериментальных исследований положен динамический метод, основанный на измерении параметров ионизации среды по длине зарядной камеры при движении воздушного потока. При этом определялись характеристики процесса ионизации (изменение концентрации ионов по сечению и длине зарядной камеры)

В лабораторной установке имеет место два вида движения заряженных ионов в воздухе: при наличии внешнего электрического поля и при его отсутствии.

Вопросы электроионизации газовой среды при наличии внешнего электрического поля были рассмотрены в работах [11-14]. Поэтому в задачи экспериментальных исследований процессов электроионизации газовой среды входило установление параметров ионизированной среды после выноса ионов за пределы разрядного промежутка в трубопровод и закономерностей изменения концентрации ионов по сечению и длине трубопровода, с целью оценки возможности использования данного вида коронного разряда для зарядки и последующей коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля. Для измерения концентрации ионов в воздушном потоке использовался аспирационный метод [15,16].

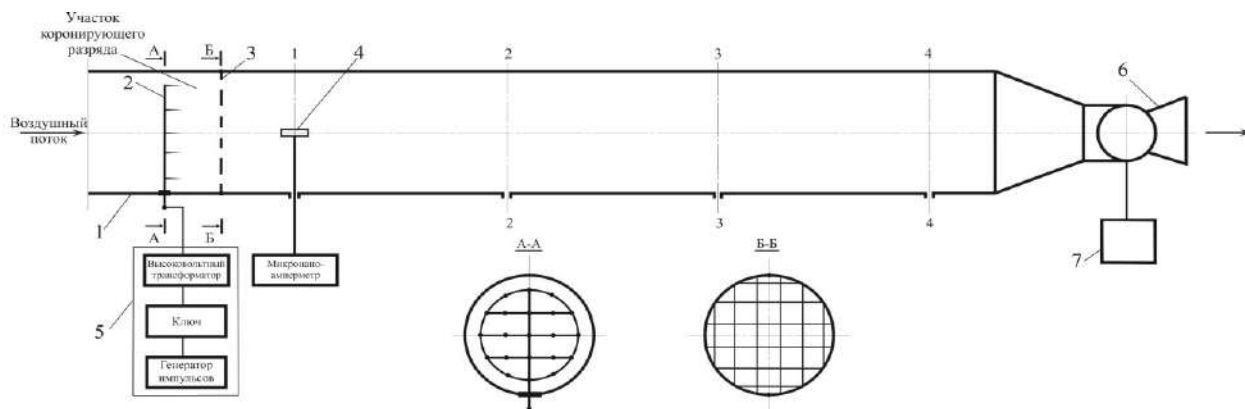


Рис. 1 - Лабораторная установка для исследования электроионизации газовой среды

Для принятого зарядного устройства характерным является неравномерное распределение концентрации ионов и напряженности поля по сечению камеры, а, следовательно, заряд частиц может зависеть от положения их траектории относительно оси камеры. Поэтому, для определения характера распределения ионов по сечению канала, необходимо производить замеры концентраций ионов в нескольких точках по высоте канала путем перемещения аспирационного конденсатора 4 в пределах сечения.

Импульсный коронный разряд на установке создается электродной системой в виде электродных пар, состоящих из игольчатых стержней и расположенной поперек потока воздуха крупноячеистой сеткой. Межэлектродные расстояния находятся в пределах 1...3 см [11].

При работе установки полярность коронирующих электродов меняется в соответствии с поставленными задачами исследований.

Особенностью зарядного устройства используемого в лабораторной модели является то, что во время действия импульса высоковольтного напряжения наблюдается интенсивная ионизация среды в межэлектродном пространстве, а в моменты паузы между импульсами напряжения происходит вынос движущейся пылегазовой средой образовавшихся ионов за пределы разрядного промежутка. Зарядка крупнодисперсной фазы аэрозоля при этом практически происходит только в межэлектродном пространстве в течение времени действия импульсного напряжения. Зарядка мелкодисперсной фазы аэрозоля осуществляется в течение всего времени нахождения частиц, как в межэлектродном пространстве, так и при дальнейшем перемещении пылегазовой среды в трубопроводе, вплоть до перемешивания двух потоков с разноименными ионами [16].

Длительность импульса напряжения для зарядного устройства выбиралась такой, чтобы, с одной стороны, за время его действия полностью происходило насыщение межэлектродного пространства ионами, а с другой - свести к минимуму

стекание ионного тока во время действия импульса на сетку. В таком случае энергия источника высоковольтного напряжения в основном расходуется на насыщение среды ионами и обеспечивается максимальная энергетическая эффективность процесса зарядки. В первом приближении она может быть рассчитана как

$$t_u = c / kE_{cp},$$

где c – расстояние между электродами, м; k – подвижность ионов; E_{cp} – среднее значение напряженности поля в межэлектродном пространстве, В/м.

Выразив напряженность поля через величину напряжения импульса U_e , получим

$$t_u = c^2 / kU_u \quad (1)$$

При известных расстояниях между электродами и величине напряжения импульса, рассчитанная по приведенному выражению длительность импульса напряжения зависит от подвижности ионов. В зависимости от подвижности, ионы принято делить на легкие, средние, и тяжелые. Отрицательно заряженные ионы образуются при присоединении к нейтральной молекуле электрона, причем к электрону примерно через 10^{-7} секунды присоединяется до 3-9 нейтральных молекул, образуя при этом отрицательно заряженный ионный кластер. Положительно заряженные ионы – молекулы у которых, как правило, не хватает одного электрона. Такие молекулы примерно через 10^{-7} секунды присоединяет к себе 4-12 нейтральных молекул, образуя положительно заряженный ионный кластер. Ввиду этого подвижность ионов может изменяться в довольно широких пределах и существенно зависит от времени, прошедшего с момента образования иона. Так, авторами работы [16] установлено, что в непосредственной близости около короны

подвижность ионов в среднем составляет $0,5 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с), а по мере удаления от разряда она снижается до $0,1 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с).

В этом случае при подвижности $0,1 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) рассчитанная по выражению (1) длительность импульса напряжения для зарядного устройства с расстоянием между электродами 0,005 м при напряжении импульса равном 25 кВ составит $1 \cdot 10^{-4}$ с.

Ввиду сложности распределения концентрации ионов и напряженности электрического поля в камере такой формы аналитическое описание процесса зарядки весьма затруднено. С целью получения математического описания рассмотрим процессы зарядки пыли в близкой по протекающим процессам камере типа "острие - цилиндр".

Процессы зарядки частиц пыли достаточно хорошо изложены в литературе для зарядных камер с протеканием коронного разряда в системе электродов типа «нить - цилиндр» [13], для которых имеется более-менее строгое математическое описание напряженности поля между электродами и распределения ионов в межеэлектродном пространстве.

Для зарядных камер в которых в качестве коронирующих электродов используется острие, процесс зарядки математически достаточно строго описан для 3-х секционных и 2-х секционных [12] плоских зарядных устройствах, в которых заряд частиц слабо зависит от положения их траектории. Для уменьшения осаждения пыли на стенках камеры к сеткам зарядной секции прикладывается переменное напряжение с частотой $f = 100 \dots 800$ Гц. Кроме того, запыленный воздух выпускается полоской по центру зарядной секции, а в остальную часть камеры поступает воздух, предварительно очищенный от пыли с помощью фильтров. Такая конструкция зарядных секций позволяет получить практически по всему объему секций равномерную концентрацию ионов и постоянную напряженность поля, что использовалось авторами [12] для определения концентрации монодисперсных аэрозолей. Ввиду значительной сложности этих камер, применение их нецелесообразно в устройствах для интенсификации улавливания пыли.

Из выражения полученного для системы электродов «нить-цилиндр» [11]

$$E'_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{r_0}{r}\right)^2} - E_0 \frac{r_0}{r},$$

где I – ток на единицу длины коронирующего электрода; r_0 – радиус коронирующего электрода; r – координата точки межеэлектродного пространства; E_0 – критическая напряженность; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы) следует, что во время паузы между импульсами высоковольтного напряжения максимальное значение напряженности электрического поля в межеэлектродном пространстве, обусловленного наличием объемного заряда ионов (при расстоянии между электродами 0,005 м и напряжении импульса равном 25 кВ) наблюдается у наружного электрода и не превышает $0,5 \cdot 10^5$ В/м. При подвижности ионов $0,5 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) максимально возможная скорость стекания ионов на заземленный электрод для этого случая составляет 2,5 м/с. Учитывая то, что вне коронного разряда подвижность ионов снижается до $0,1 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с), а также то, что выражение для определения величины напряженности электрического поля в межеэлектродном пространстве было получено для бесконечно длинного участка разряда, а в предложенной системе электродов длина участка зарядки незначительна, реальная скорость стекания ионов на заземленный электрод будет существенно меньше 2,5 м/с [13]. Это позволяет за время паузы между импульсами напряжения обеспечить практически полный их вынос из межеэлектродного пространства движущимся пылегазовым потоком.

Длительность паузы между импульсами напряжения целесообразно выбирать такой, чтобы обеспечить за это время вынос образовавшихся ионов движущимся пылегазовым потоком за пределы разрядного промежутка. При расположении конца острия непосредственно у сетки и толщине сетки d , длительность паузы в первом приближении может быть определена как

$$t_u = d / V_{cp}$$

где V_{cp} – скорость движения пылегазовой среды, м/с.

Для зарядного устройства с толщиной сетки $3 \cdot 10^{-3}$ м, при скорости движения пылегазовой среды 1 м/с, длительность паузы между импульсами напряжения составит $3 \cdot 10^{-3}$ с [11].

В реальном устройстве параметры импульсного напряжения должны быть уточнены путем поиска максимума потока ионов на контрольный электрод, расположенный в трубопроводе за межеэлектродным пространством по ходу движения пылегазовой среды.

Измерение концентрации ионов производилось по длине канала через каждые 0,5 м.

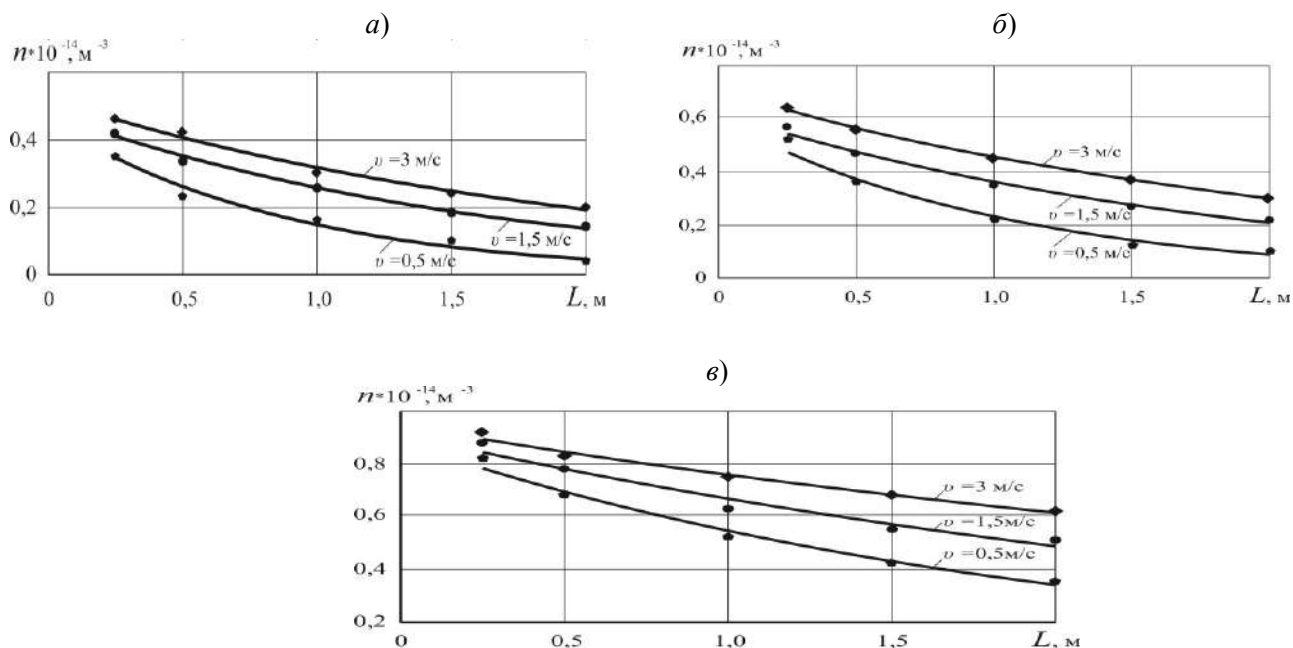


Рис. 2 - Зависимость концентрации ионов n от расстояния до сетки L при напряжении импульса:
а – $U_i = 15 \text{ кВ}$; б – $U_i = 20 \text{ кВ}$; в – $U_i = 25 \text{ кВ}$

При выполнении экспериментальных исследований электроионизации газовой среды в лабораторной установке измерение концентрации ионов производилось в пяти точках по оси камеры. Первая точка выбиралась на расстоянии 0,25 м от сетки, а последующие - располагались по длине канала через каждые 0,5 м. При исследованиях определялась зависимость концентрации ионов n от расстояния до сетки при различной амплитуде ионизирующего напряжения и трех скоростях движения воздушного потока. При этом длительность импульса напряжения составляла 10^{-4} с, а длительность паузы между импульсами напряжения - $3 \cdot 10^{-3}$ с. Результаты измерения концентрации ионов n по оси камеры от расстояния до сетки L при напряжении импульсов а) 15 кВ, б) 20 кВ и в) 25 кВ приведены на рис. 2, из которого видно, что концентрация ионов на участке без внешнего электрического поля по длине равномерно снижается по ходу движения воздушного потока. Это происходит вследствие стекания ионов на стенки канала в результате их диффузии и направленного движения под воздействием электростатического поля объемного заряда потока ионов.

С увеличением скорости воздушного потока наблюдается как увеличение концентрации ионов в начальной точке трубопровода, так и более высокая их концентрация по длине трубопровода, что объясняется увеличением выноса ионов из разрядного промежутка и меньшей продолжительностью их пребывания в трубопроводе.

При увеличении напряжения импульса U_i наблюдается увеличение начальной концентрации ионов n_0 . Судя по уменьшению расстояния между

экспериментальными точками по мере приближения к сетке, начальная концентрация ионов не очень существенно зависит от скорости потока, что свидетельствует о достаточно хорошем выносе ионов за пределы разрядного промежутка при выбранных параметрах импульсов ионизирующего напряжения.

Таким образом, экспериментальные данные, приведенные в виде графиков функций концентрации ионов в зависимости от расстояния до источника ионизации, свидетельствуют о том, что вынос ионов увеличивается с увеличением скорости воздушного потока, а их концентрация увеличивается с увеличением напряжения импульса.

В реальных условиях скорость воздушного потока в каналах аспирационных систем может изменяться в довольно широких диапазонах, что обуславливается увеличением или уменьшением расхода воздуха в отдельных элементах аспирационной системы в связи с нарушением структуры сети воздухопроводов. Снижение расхода воздуха, а следовательно и уменьшение его скорости в каналах аспирационных систем может быть связано с различием между расчетными значениями аэродинамических параметров воздухопроводов и их реальными значениями, которые могут также меняться с течением времени. Кроме того, скорость аспирируемого потока ограничивается технологическими параметрами и ее значения могут определяться в зависимости от конструкции технологического оборудования, типа аспирационной системы и др.

Величина напряжения импульса ограничивается параметрами зарядного устройства, при которых исключается «пробой». Максимальным

значением величины напряжения импульса, при котором не наблюдался «пробой», является 25 кВ.

По мере уменьшения размеров частиц, все большее влияние на их зарядку оказывают диффузионные процессы и при $\rho < 0,1$ мкм процесс зарядки можно считать чисто диффузионным, так как кулоновское поле частиц становится значительно больше величины внешнего поля E_0 . При решении задачи зарядки этих частиц рассматривается диффузия ионов в электрическом поле частицы [14]. При диффузионном механизме зарядки заряд растет во времени неограниченно. Объясняется это тем, что по мере накопления заряда на частице и роста его отталкивающего действия растет градиент концентрации ионов у поверхности частицы за счет сосредоточения изменения концентрации все в более узком слое вблизи поверхности частицы. Однако график функции, описывающей скорость диффузионного процесса зарядки [14] (рис. 3), показывает, что основной заряд частица приобретает в начальный период времени ($n_0 t \leq 2 \cdot 10^7$ с/см³), а далее он изменяется мало. За предельный заряд принимается $A_{пред} = 6,7$ при $n_0 t = 4 \cdot 10^7$ с/см³.

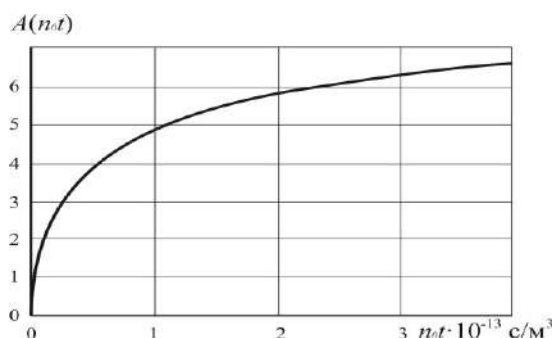


Рис. 3 - График функции описывающей скорость диффузионного процесса зарядки

Заряд частиц в этом случае определяется выражением

$$g = 4\pi\epsilon_0\rho\frac{kT}{e}A(n_0t), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; e – заряд иона, Кл; $A(n_0t)$ – временная функция, характеризующая скорость диффузионного процесса зарядки.

Зависимости концентраций ионов аппроксимировались и определялось эмпирическое соотношение, описывающее влияние расстояния до источника испускания ионов (игольчатого электрода) на объемную концентрацию ионов. Аппроксимация экспериментальных данных производилась уравнением вида

$$n = ae^{-bL} \quad (3)$$

где n – объемная концентрация легких отрицательных аэроионов (см-3); L – расстояние до ионизатора, м; a и b – некоторые числовые коэффициенты, значения которых зависят от скорости воздушного потока v и величины напряжения импульса U_i .

В результате статистической обработки опытных данных получены зависимости величин n от L для различных скоростей воздушного потока и напряжения импульса $U_i = 15$ кВ:

- при $v = 0,5$ м/с и $R_2 = 0,97$

$$n = 4635 \cdot 10^{10} e^{-1,148L}$$

- при $v = 1,5$ м/с и $R_2 = 0,99$

$$n = 4786 \cdot 10^{10} e^{-0,622L}$$

- при $v = 3,0$ м/с и $R_2 = 0,99$

$$n = 5178 \cdot 10^{10} e^{-0,494L}$$

Из полученных выражений видно, что коэффициенты a и b изменяются в зависимости от величины v

$$a = 4510 \cdot 10^{10} e^{0,045v}; \quad b = 0,8061 \cdot v^{-0,478} \quad (4, 5)$$

Подставляя (3) и (4) в выражение (2) получим зависимость концентрации ионов n от скорости потока воздуха v и значений L при напряжении импульса 15 кВ.

$$n_{15} = 0,4510 \cdot 10^{14} \cdot \exp(0,045 \cdot v) \cdot \exp(-0,9117 \cdot v^{-0,644} L)$$

Зависимости величин n от L для различных скоростей воздушного потока для величины напряжения импульса равной 20 кВт отличаются от аналогичных зависимостей для 15 кВт величиной коэффициентов и имеют следующий вид при разных коэффициентах корреляции R :

- при $v = 0,5$ м/с и $R_2 = 0,97$ $n = 6017 \cdot 10^{10} e^{-0,966L}$, (6)

- при $v = 1,5$ м/с и $R_2 = 0,99$ $n = 6253 \cdot 10^{10} e^{-0,542L}$, (7)

- при $v = 3,0$ м/с и $R_2 = 0,99$ $n = 7003 \cdot 10^{10} e^{-0,427L}$ (8)

Зависимость концентрации ионов n от скорости потока воздуха v и значений L при напряжении импульса 20 кВ, полученная на основании регрессионных уравнений (6) – (8) имеют вид:

$$n_{20} = 0,5782 \cdot 10^{14} \cdot \exp(0,062 \cdot v) \cdot \exp(-0,6877 \cdot v^{-0,462} L)$$

Зависимости величин n от L для различных скоростей воздушного потока для величины напряжения импульса равной 25 кВт отличаются от аналогичных зависимостей для 20 кВт величиной

коэффициентов и имеют следующий вид при разных коэффициентах корреляции R:

$$- \text{при } v = 0,5 \text{ м/с и } R2 = 0,97 \quad n = 8807 \cdot 10^{10} e^{-0,48L} \quad (8)$$

$$- \text{при } v = 1,5 \text{ м/с и } R2 = 0,99 \quad n = 9133 \cdot 10^{10} e^{-0,315L} \quad (9)$$

$$- \text{при } v = 3,0 \text{ м/с и } R2 = 0,99 \quad n = 9448 \cdot 10^{10} e^{-0,217L} \quad (10)$$

При величине напряжения импульса равной 25 кВ, зависимость концентрации ионов n от скорости потока воздуха v и значений L имеет вид:

$$n_{25} = 0,8714 \cdot 10^{14} \cdot \exp(0,078 \cdot v) \cdot \exp(-0,3603 \cdot v^{-0,438} L)$$

Выводы

На основании выполненных исследований установлено, что вынос ионов увеличивается с увеличением скорости воздушного потока, а их концентрация увеличивается с увеличением напряжения импульса, однако скорость воздушного потока ограничивается технологическими параметрами и ее значения определяются в зависимости от условий (конструкции технологического оборудования, типа аспирационной системы и др.), а величина напряжения импульса ограничивается параметрами зарядного устройства при которых исключается «пробой».

Полученные в результате исследований зависимости концентраций аэроионов от расстояния до ионизатора позволяют устанавливать заданную ионную концентрацию, обеспечивающую вынос образовавшихся положительных и отрицательных ионов за пределы этого промежутка.

Список литературы

1. Токарев, А. В. Коронный разряд и его применение / А. В. Токарев. – Бишкек: КРСУ, 2009. – 138 с.
2. Cotrell, F. G. Art of Separating Suspended Particles from Gaseous Bodies. U.S. Patent, 895,729. 1908.
3. Чекалов, Л. В. Экотехника / Л. В. Чекалов. – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с
4. Ashmarin, G. V. The estimation of steel rope quality by a corona discharge / G. V. Ashmarin, V. M. Lelevkin, I. A. Niyazaliev, A. V. Tokarev // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. – Minsk, Belarus, 16-22 September, 2006. – Vol.2. – p. 808–811.
5. Литвинов, В. Е. Применение теории плазмы для исследования физических процессов в электрографии и электростатической печати / В. Е. Литвинов // Прикладная физика, 2002. – № 4. – С. 38–47
6. Balcer, B. E. EHD-Enhanced Drying with Multiple-Wire Electrode / B. E. Balcer, F. C. Lai // Drying Technology. – 2004. – Vol.22, Issue 4. – p. 821–836. – doi:10.1081/DRT-120034265.
7. Коробцев, С. В. Вопросы применения и получения озона / С. В. Коробцев, Д. Д. Медведев, В. Л. Ширяевский // Информационный центр «Озон». – 1997. – № 7 (1). – С. 35–45.

8. Naidis, J. V. Effects of nonlocality on the dynamics of streamers in positive corona discharge / J. V. Naidis // Technical Physics Letters. – 1997. – Vol. 23, Issue 6 – p. 493–495. – doi:10.1088/0022-3727/47/43/435202.
9. Попов, Н. А. Spatial Structure of the Branching Streamer Channels in a Corona Discharge / N. A. Popov // 11 Plasma Physics Reports. – 2002. – Vol.28, Issue 7 – p. 615–623. – doi: 10.1134/1.1494061.
10. Ашмарин, Г. В. О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда / Г. В. Ашмарин, К. С. Ким, А. В. Токарев // Вестник КРСУ. – 2002. – Т. 2. – № 2. – С. 47–52
11. Голинько, В. И. Использование зарядки аэрозоль в поле коронного разряда для интенсификации процессов очистки от пыли аспирационных потоков / В. И. Голинько, Д. С. Пустовой // Геотехнічна механіка: зб. наук. пр. – 2015. – № 122. – С. 253–263.
12. Голинько, В. И. Обоснование параметров процесса зарядки пыли в поле импульсного униполярного коронного разряда / В. И. Голинько, Д. С. Пустовой // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2015. – № 1. – С. 151–156.
13. Пустовой, Д. С. Повышение энергетической эффективности зарядки аэрозоль при очистке воздушного потока от высокодисперсной пыли / Д. С. Пустовой // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2015. – №61(102) – С. 139–151.
14. Мирзабекян, Г. З. Зарядка аэрозоль в поле коронного разряда // Сильные электрические поля в технологических процессах / Г. З. Мирзабекян // – Москва: Энергия, 1969. – С. 20 – 39.
15. Таммет, Х. Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов / Х. Ф. Таммет // Ученые записки Тартуского гос. Университета. – 1967.– Вып. 195. – 232 с.
16. Черный, К. А. Модификация спектра аэроионов при ионизации воздуха / К. А. Черный, А. В. Храмов // Вектор науки ТГУ. – 2010. – №4(14). – С. 65–68.

Bibliography (transliterated)

1. Tokarev, A. V. Koronnyiy razryad i ego primenenie [Corona discharge and its application]. Bishkek: KRSU, 2009. – 138 p.
2. Cotrell, F. G. Art of Separating Suspended Particles from Gaseous Bodies. U.S. Patent, 895,729. 1908.
3. Chekalov, L. V. Ecotecnica [Echotechnics]. Yaroslavl: Russia, 2004, 424.
4. Ashmarin, G. V., Lelevkin, V. M., Niyazaliev, I. A., Tokarev, A. V. The estimation of steel rope quality by a corona discharge. 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. – Minsk: Belarus, 2006, 2, 808–811.
5. Litvinov, V. E. Application of the theory of plasma for the study of physical processes in electrography and electrostatic printing [Primenenie teorii plazmyi dlya issledovaniya fizicheskikh protsessov v elektrografii i elektrostatcheskoy pechaty]. Prikladnaya fizika, 2002, 4, 38–47.
6. Balcer, B. E., Lai, F. C. EHD-Enhanced Drying with Multiple-Wire Electrode. Drying Technology, 2004, 4, 821–836. – doi:10.1081/DRT-120034265.
7. Korobtsev, S. V., Medvedev, D. D., Shiriaevski, V. L. Voprosy primeneniya i polucheniya ozona [Issues to apply ozone and produce it]. Informatsionnyi tsentr «Ozon», 1997, 7 (1), 35–45.

8. **Naidis, J. V.** Effects of nonlocality on the dynamics of streamers in positive corona discharge. *Technical Physics Letters*, 1997, **6**, 493-495. – doi:10.1088/0022-3727/47/43/435202.
9. **Popov, N. A.** Spatial Structure of the Branching Streamer Channels in a Corona Discharge. *II Plasma Physics Reports*. 2002, **28**, 7, 615-623. – doi: 10.1134/1.1494061.
10. **Ashmarin, G. V., Kim, K. S., Tokarev, A. V.** О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда [About physical mechanisms of burning of a linear crown flare discharge], *Vestnik KRSU*, 2002, **2(2)**, 47-52.
11. **Golinko, V. I., Pustovoi, D. S.** Ispolzovanie zaryadki aerorozley v pole koronnogo razryada dlya intensifikatsii protsessov ochistki ot pyili aspiratsionnykh potokov [Aerosol charges within corona charge field to intensify processes of aspiration flows dust extraction]. *Geotekhnichna mekhanika: zbirka naukovykh prats*, 2015, **122**, 253-263.
12. **Golinko, V. I., Pustovoi, D. S.** Obosnovanie parametrov protsessa zaryadki pyili v pole impulsnogo unipolyarnogo koronnogo razryada [Substantiation of dust charge process parameters within a field of pulse unipolar corona charge]. *Metalurgichna ta girnychorudna promyslovist*, 2015, **1**, 151-156.
13. **Pustovoi, D. S.** Povyishenie energeticheskoy effektivnosti zaryadki aerorozley pri ochistke vozdušnogo potoka ot vyisokodispersnoy pyili [Improving power efficiency of aerosol charge in the process of airflow fine-disperse dust purification]. *Zbagachennia korysnykh kopalyn: Naukovo-tekhnichna zbirka*, 2015, **61(102)**, 139-151.
14. **Mirzabekian, G. Z.** Zaryadka aerorozley v pole koronnogo razryada [Aerosol charge within corona charge field]. *Silnye elektricheskie polia v tekhnologicheskikh protsessakh*. – Moskva.: Energia, 1969, 20 – 39.
15. **Tammet, H. F.** Aspiratsionnyy metod izmereniya spektra aeroionov [Aspiration technique for air ion spectrum measurement]. *Uchionye zapiski Tartusskogo gosudarstvennogo universiteta*, Tartu, 1967, **195**, 232.
16. **Chiorny, K. A., Khramov, A. V.** Modifikatsiya spektra aeroionov pri ionizatsii vozduha [Modification of air ion spectrum in the process of air ionization]. *Vektor nauki TGU*, 2010, № **4(14)**, 65-68.

Відомості про авторів (About the authors)

Пустовой Дмитрий Сергеевич – к.т.н., ассистент кафедры основ конструирования механизмов и машин, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Днепр, Украина; e-mail: pustovoi.d.s@gmail.com.

Dmytro Pustovoi – Ph.D Associate Professor, Department of machinery design fundamentals, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, Ukraine; e-mail: pustovoi.d.s@gmail.com.

Чеберячко Иван Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Днепр, Украина; e-mail: cheberiachko.i.m@nmu.one.

Ivan Cheberiachko – Candidate of Technical Science (Ph.D), Associate Professor department of Mining mechanics, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, Ukraine, cheberiachko.i.m@nmu.one.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пустовой, Д. С. Исследование распределения концентрации ионов при использовании импульсного коронного разряда для зарядки тонкодисперсной фазы аэрозоля / **Д. С. Пустовой, И. М. Чеберячко**, // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 11-18. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.02.

Please cite this article as:

Pustovoi, D. S., Cheberiyachko, I. M. Analysis of electroionization processes while applying pulse corona discharge to charge finely dispersed aerosol phase. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 11–18, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.02.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Пустовой, Д. С. Дослідження процесів електроіонізації під час використання імпульсного коронного розряду для зарядки тонко дисперсної фази аерозолю / **Д. С. Пустовой, І. М. Чеберячко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 11-18. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.02.

АНОТАЦІЯ Розглянуто питання процесів електроіонізації при використанні імпульсного коронного розряду, а також запропонована система коронуючих електродів типу «вістря - сітка». Встановлено залежність концентрації аероіонів від відстані до іонізатора, що дозволяє встановлювати заданий іонний склад для накопичення максимально можливої величини заряду на дрібнодисперсних частинках. Також на підставі виконаних досліджень запропоновано пристрій для формування імпульсу високовольтної напруги, що дозволяє інтенсифікувати іонізацію середовища в міжелектродному просторі і в моменти паузи між імпульсами напруги забезпечити винос утворених іонів за межі розрядного проміжку пило газів середовищем, що рухається.

Ключові слова: електроіонізація; імпульсний коронний розряд; імпульсна напруга; аерозоль; зарядна камера; коагуляція.

Поступила (received) 05.12.2017